

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

ANNÉE 1923

THÈSE

N°

336

POUR

LE DOCTORAT EN MÉDECINE

Travail du Laboratoire d'organisation technique du Travail humain
du Conservatoire National des Arts et Métiers
et du Laboratoire de Physiologie appliquée à l'Education physique
de la Faculté de Médecine de Paris

ÉTUDE

SUR LA

Physiologie de la Marche en descente

PAR

Robert FAILLIE

Chevalier de la Légion d'Honneur

Préparateur de la Chaire d'organisation technique du Travail humain
du Conservatoire National des Arts et Métiers

Président : M. ANDRÉ BROCA, Professeur

PARIS

AMÉDÉE LEGRAND, ÉDITEUR

93, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 93

1923

1008

THÈSE
POUR
LE DOCTORAT EN MÉDECINE

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

ANNÉE 1923

THÈSE

POUR

LE DOCTORAT EN MÉDECINE

Travail du Laboratoire d'organisation technique du Travail humain
du Conservatoire National des Arts et Métiers
et du Laboratoire de Physiologie appliquée à l'Éducation physique
de la Faculté de Médecine de Paris

ÉTUDE

SUR LA

Physiologie de la Marche en descente

PAR

Robert FAILLIE

Chevalier de la Légion d'Honneur

Préparateur de la Chaire d'organisation technique du Travail humain
du Conservatoire National des Arts et Métiers

Président : M. ANDRÉ BROCA, Professeur

PARIS

AMÉDÉE LEGRAND, ÉDITEUR

93, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 93

1923

Faculté de Médecine de Paris

DOYEN.....

PROFESSEURS.....

Anatomie.....
Anatomie médico-chirurgicale.....
Physiologie.....
Physique médicale.....
Chimie organique et chimie générale.....
Bactériologie.....
Parasitologie et Histoire naturelle médicale.....
Pathologie et Thérapeutique générale.....
Pathologie médicale.....
Pathologie chirurgicale.....
Anatomie pathologique.....
Histologie.....
Pharmacologie et matière médicale.....
Thérapeutique.....
Hygiène.....
Médecine légale.....
Histoire de la médecine et de la chirurgie.....
Pathologie expérimentale et comparée.....

Clinique médicale.....

Hygiène et clinique de la 1^{re} enfance.....
Clinique des maladies des enfants.....
Clinique des maladies mentales et des maladies de l'encéphale.....
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques.....
Clinique des maladies du système nerveux.....
Clinique des maladies contagieuses.....

Clinique chirurgicale.....

Clinique ophtalmologique.....
Clinique des maladies des voies urinaires.....

Clinique d'accouchement.....

Clinique gynécologique.....
Clinique chirurgicale infantile.....
Clinique thérapeutique.....
Clinique oto-rhino-laryngologique.....
Clinique thérapeutique chirurgicale.....
Clinique propédeutique.....

M. ROGER

MM.

NICOLAS
CUNEO
CH. RICHET
André BROCA.
DESGREZ
BEZANÇON
BRUMPT
MARCEL LABBE
N.
LECENE.
LETULLE
PRENANT
RICHAUD
CARNOT
LÉON BERNARD
BALHAZARD
MENETRIER
ROGER
ACHARD
WIDAL
GILBERT
CHAUFFARD
MARFAN
NOBECOURT
CLAUDE
JEANSELME
PIERRE MARIE
TEISSIER
DELBET
LEJARS
HARTMANN
GOSSET
DE LAPERSONNE
LEGUEU
BRINDEAU
JEANNIN
COUVELAIRE
J. L. FAURE
AUGUSTE BROCA
VAQUEZ
SEBILEAU
DUVAL
SERGENT

AGRÉGÉS EN EXERCICE

MM.

ABRAMI
ALGLAVE
BASSET
BAUDOIN
BLANCHETIERE
BRANCA
CAMUS
CHAMPY
CHEVASSU
CHIRAY
CLERC
DEBRE
DESMAREST

DUVOIR
FIESSINGER
GARNIER
GOUGEROT
GREGOIRE
GUENIOT
GUILLAIN
HEITZ-BOYER
JOYEUX
LABBE (HENRI)
LAIGNEL-LAVASTINE
LANGLOIS

LARDENNOIS
LE LORIER
LEMIERRE
LEQUEUX
LEREBoullet
LERI
LEVY-SOLAL
MATHIEU
METZGER
MOCQUOT
MULON
OKINCZYC
PHILIBERT

RATHERY
RETTERRER
RIBIERRE
ROUSSY
ROUVIERE
SCHWARTZ (A)
TANON
TERRIEN
TIFENEAU
VILLARET

Par délibération en date du 9 décembre 1798, l'Ecole a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.



A LA MÉMOIRE DE MON PÈRE

A MA MÈRE

A MA FEMME

*Faible témoignage de reconnaissance
et d'affection.*

A MON PRÉSIDENT DE THÈSE

M. LE PROFESSEUR ANDRÉ BROCA

PROFESSEUR DE PHYSIQUE MÉDICALE A LA FACULTÉ
DE MÉDECINE DE PARIS

MEMBRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

CHEVALIER DE LA LÉGION D'HONNEUR

*En le remerciant des conseils précieux
qu'il nous a donnés, et de l'honneur
qu'il nous fait en acceptant de pré-
sider notre thèse.*

A MON MAÎTRE

M. LE PROFESSEUR J. P. LANGLOIS

OFFICIER DE LA LÉGION D'HONNEUR

PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS
ET MÉTIERS

PROFESSEUR CHARGÉ DE COURS
A LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

MEMBRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

*Hommage de profonde reconnaissance
et de respectueux attachement.*

A MES MAÎTRES DANS LES HÔPITAUX

A MM.

PROFESSEUR H. HARTMANN

PROFESSEUR DE CLINIQUE CHIRURGICALE

CHIRURGIEN DE L'HÔTEL-DIEU

PROFESSEUR AGRÉGÉ OKINCZYC

CHIRURGIEN DES HÔPITAUX

DOCTEUR LAUNAY, CHIRURGIEN DES HÔPITAUX

PROFESSEUR AGRÉGÉ THIERRY

CHIRURGIEN DES HÔPITAUX

DOCTEUR BERGE, MÉDECIN DE L'HÔPITAL BROUSSAIS

DOCTEUR LESNÉ, MÉDECIN DE L'HÔPITAL TROUSSEAU

PROFESSEUR COUVELAIRE

PROFESSEUR DE CLINIQUE OBSTÉTRICALE

A LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

PROFESSEUR L. BERNARD

PROFESSEUR D'HYGIÈNE A LA FACULTÉ DE MÉDECINE

MÉDECIN DES HÔPITAUX

PROFESSEUR NOBÉCOURT

PROFESSEUR DE CLINIQUE DES MALADIES DES ENFANTS

Avant-Propos

De tous les travaux accomplis par l'homme, aucun n'est plus commun, ni plus normal, que celui de la marche. L'enfant à sa naissance est incapable de marcher, mais, alors qu'il ne s'était jamais auparavant tenu dans la station verticale, il n'est pas rare de le voir, dès que son système locomoteur a acquis un développement suffisant, faire ses premiers pas sous l'impulsion d'une peur ou d'un plaisir. Il suffit de se reporter aux observations de Woodworth, de Kirpatrick et de Trettien, pour en avoir de nombreux exemples. La marche est donc instinctive.

Tout homme, si sédentaire qu'il soit, effectue chaque jour une marche appréciable. Il est très rare de trouver des individus effectuant moins de 3 à 4 kilomètres de marche journalière. Benedict nous cite l'exemple d'un de ses collaborateurs qui accomplissait, sans sortir de son laboratoire, une marche journalière de 9 km. $\frac{1}{2}$. Ce chiffre est une moyenne tirée d'une observation de plusieurs mois.

La marche a été étudiée depuis fort longtemps ; les premiers travaux sur ce sujet remontent au XVII^e siècle. Cependant sa complexité et les difficul-

lés d'interprétation des différents mouvements nécessités par la locomotion ont arrêté les chercheurs. Si des travaux remarquables ont déjà été faits sur ce sujet, il nous a semblé que la marche *en* descente sur plan incliné était insuffisamment étudiée. Sous la direction scientifique si bienveillante de notre vénéré Maître, M. le Professeur Langlois, nous avons pu faire dans son laboratoire toutes les recherches et expériences que cette étude a nécessitées. Nous nous faisons un devoir et un plaisir de lui témoigner ici encore notre profonde reconnaissance. Nous pensons apporter dans ce travail des résultats suffisamment précis pour élucider ce problème si complexe de la marche en descente sur plan incliné, résultats obtenus à la suite de nombreuses expériences faites au cours de ces deux dernières années.

Introduction

Marey donne de la marche, la définition suivante : « Un mode de progression dans lequel l'un des pieds vient s'appuyer sur le sol avant que l'autre l'ait quitté ». Il différencie ainsi la marche de la course où : « l'un des pieds vient s'appuyer sur le sol alors que l'autre l'a déjà quitté ».

Trois méthodes se sont présentées successivement à l'esprit des chercheurs pour déterminer la valeur du travail dans la marche : la première en date est basée sur l'effet utile de Coulomb ; la deuxième est appuyée sur la mécanique générale, selon le principe posé par Marey ; enfin la troisième est basée sur la mesure des échanges respiratoires pendant la marche.

Examinons successivement ces trois méthodes :

1. *Mesure indirecte d'après l'effet utile de Coulomb.*

Le principe qui doit être admis est l'équivalence énergétique de la journée d'un marcheur avec celle d'un ouvrier accomplissant un travail facilement mesurable. Le temps de marche et le temps du travail sont les mêmes, l'ouvrier et le marcheur

ont une constitution aussi comparable que possible et ils doivent atteindre le même degré de fatigue.

En huit heures un bon ouvrier fournit, sans fatigue, un travail d'environ 250.000 kilogrammètres. D'autre part, Coulomb a désigné sous le nom d'effet utile de la marche, le produit du chemin parcouru en terrain horizontal par le poids transporté. Un homme du poids de 72 k. 5, non chargé, peut faire, d'après Haughton, 32 kilomètres de trajet horizontal sans être fatigué : ce qui correspond à l'effet utile :

$$72,5 \times 32.000 = 2.320.000$$

Selon le principe posé nous admettons donc que l'ouvrier avec ses 250.000 kgm. fait un travail énergétiquement équivalent à celui du marcheur de Haughton qui produit l'effet utile : 2.300.000. L'unité d'effet utile correspondra donc à :

$$\frac{250.000}{2.320.000} = 0,108 \text{ kgm.}$$

Un homme moyen du poids de 65 kilogrammes fournira, par kilomètre, un travail correspondant à 65.000 effet utile, équivalent à :

$$65.000 \times 0,108 = 7.000 \text{ kgm.}$$

Cependant le postulat sur lequel cette méthode s'appuie est vraiment trop incertain pour qu'il soit possible d'accepter sans réserve ce chiffre.

2. *Calcul du travail dans la marche horizontale*, basé sur les lois de la mécanique générale.

Au point de vue vectoriel, la somme algébrique des travaux partiels du corps humain pendant la marche en terrain horizontal est nulle. En effet, chaque élément positif du travail pendant la marche est annulé par un travail négatif de même valeur ; leur projection sur un axe vertical est nulle. D'autre part, le déplacement se fait suivant un plan horizontal, donc : aucun travail de pesanteur ne peut se produire.

Mais si le travail de la marche horizontale au point de vue vectoriel est nul, il n'en est pas de même au point de vue énergétique, car la marche exige une certaine dépense d'énergie. Il faut donc calculer l'équivalent moteur qui aurait occasionné la même dépense d'énergie.

Marey, grâce à l'emploi simultané de la méthode graphique et de la chronophotographie décompose la marche en trois équivalents moteurs essentiels, qui pour chaque pas simple sont :

1° L'oscillation verticale du corps. T^1

2° La variation périodique de sa force vive. T^2

3° L'oscillation du membre inférieur libre. T^3
négligeant le balancement latéral, et la torsion du tronc, ainsi que le va et vient des membres supérieurs. A chaque pas simple le corps fait un double mouvement de soulèvement et d'abaissement, or le travail d'un système soumis aux forces de la pesan-

leur, est égal au produit du poids de ce système par le déplacement vertical de son centre de gravité. Si h est le déplacement, P le poids du système, le travail de soulèvement sera Ph ; le travail d'abaissement symétrique du premier, de sens contraire, étant résistant, sera, si on applique la loi de Chau-

veau sur le travail résistant : $\frac{Ph}{2}$

T^1 équivalent moteur de l'oscillation verticale sera égal en définitive à $\frac{3}{2} Ph$.

L'équivalent moteur T^2 , correspondant à la variation périodique de force vive, est plus délicat à calculer. Il faut envisager cette variation comme un mouvement à trajectoire horizontale et de direction longitudinale, se superposant au mouvement uniforme moyen de translation.

Il y a d'abord création de force vive. Si le corps a un poids P , le travail sera égal à la force vive,

$$\text{soit : } \frac{1}{2} \frac{P}{g} V^2.$$

Puis, il y a le travail de réfrènement, que nous supposerons symétrique au premier et égal à sa moitié (travail résistant).

Ce deuxième équivalent moteur sera donc égal à :

$$\frac{3}{4} \frac{P}{g} V^2$$

L'équivalent moteur de l'oscillation du membre inférieur peut être facilement calculé. En effet, on sait que le travail de rotation d'un corps de masse M. autour d'un axe, partant du repos, est égal à $\frac{1}{2} I w^2$; I étant le moment d'inertie de cette masse, et w la vitesse de rotation en radians. Par définition $I = M R^2$ R étant le rayon de giration du corps par rapport à

l'axe, w est égal à $\frac{\pi A}{180}$ A étant en degrés l'arc qui

correspond à w.

Le travail de rotation partant du repos jusqu'à l'angle A sera donc égal à :

$$\frac{1}{2} \frac{p}{g} R^2 \frac{\pi^2 A^2}{180^2} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{2} \frac{p}{g} w^2 R^2$$

et, comme précédemment, il existe une phase de réfrénement, T³ sera en définitive égal à :

$$\frac{3}{4} \frac{p}{g} w^2 A^2$$

La formule générale de la marche en terrain horizontal sera donc :

$$T = \frac{3}{2} Ph + \frac{3}{4} \frac{P}{g} v^2 + \frac{3}{4} \frac{p}{g} w^2 R^2$$

Par kilomètre, en supposant que le nombre de pas simples est égal à n on aura :

$$T = \frac{3}{2} n Ph + \frac{3}{4} n \frac{P}{g} v^2 + \frac{3}{4} n \frac{p}{g} w^2 R^2$$

En appliquant cette formule pour un sujet de 52 kilogrammes (poids du sujet qui servit aux expériences faites au laboratoire de physiologie appliquée à l'éducation physique) faisant 1600 pas au kilomètre, et oscillant verticalement de 3 centimètres à chaque pas : on trouve que :

$$T = 3744 + 572 + 368 = 4684 \text{ kilogrammètres}$$

Etude du travail dans la marche sur plan incliné.

Il suffira d'évaluer le travail vertical et de l'ajouter à l'équivalent moteur de la marche horizontale : ce qui, pour la montée, sera représenté par la formule : T (travail marche horizontale) + Ph , P étant le poids du corps en kilogrammes et h , la hauteur dont s'est élevé le centre de gravité ; et pour la descente, en appliquant le principe de Chauveau sur le travail résistant : T (travail marche hori-

zontale), + $\frac{Ph}{2}$ en supposant que l'oscillation verti-

cale et les variations de force vive ne sont pas modifiées par l'inclinaison du terrain.

Malheureusement il est très difficile d'utiliser ces formules. Pour les appliquer, il est nécessaire de connaître des facteurs difficiles à déterminer : la hauteur d'oscillation verticale du centre de gravité, par exemple, ou les variations de sa force vive dans son mouvement horizontal. Nous sommes d'ailleurs parvenu à les mesurer, mais malgré tout, nous doutons qu'il soit absolument légitime d'assimiler les travaux résistants à des travaux positifs, physiologiquement équivalents dans la locomotion. C'est aussi l'avis de M. le Professeur André Broca, qui ajoute d'ailleurs que nous sommes encore très peu renseignés sur la valeur exacte de ce travail résistant. Cependant ces formules gardent toute leur valeur, car elles nous permettront d'interpréter les résultats de la troisième méthode que nous abordons maintenant : la détermination directe de la dépense d'énergie dans la marche, par la mesure des échanges respiratoires.

Depuis Lavoisier, nous savons que la respiration consiste en une absorption d'oxygène et une élimination d'acide carbonique. L'analyse comparée de l'air inspiré et de l'air expiré en donne la preuve. On trouve en effet pour 100 volumes de gaz expiré par l'homme :

	Air inspiré	Air expiré
Oxygène.....	20,95	16 à 17
Azote.....	79,02	79,02
Acide carbonique.....	0,03	3 à 4

Or, le nombre de calories produites par la combustion de 1 gramme d'albuminoïdes, de graisse, d'hydrate de carbone, nous est connu. D'autre part nous connaissons le poids d'oxygène nécessaire à cette combustion, et la quantité d'acide carbonique qui se produit ensuite. Il nous sera donc permis de savoir, en dosant l'oxygène ou l'acide carbonique dans l'air que rejette un homme au travail, la quantité de calories fournies par lui, et par conséquent l'énergie qu'il a dépensée.

NATURE DE L'ALIMENT	CHALEUR que dégage dans l'organisme la combustion de 1 gr. de l'aliment	CHALEUR produite par litre d'oxygène con- sommé	CHALEUR produite par litre de CO_2 exhalé
Graisse.....	8,8	4,686	6,629
Hydrate de car- bone.....	4,0	5,047	5,047
Albuminoïde.....	3,8	4,600	5,683

La connaissance d'un autre élément, le quotient respiratoire de Pflüger, nous permettra de prendre un chiffre moyen pour le nombre de calories produit par la combustion d'un litre d'oxygène ou l'élimination d'un litre d'acide carbonique.

Le quotient respiratoire reste très voisin de 0,80 pendant un travail d'intensité moyenne. Mais il n'est pas constant ; sa variation est faible si l'énergie fournie n'est pas trop considérable et si le temps du travail n'est pas trop long. Dans le cas contraire, le quotient respiratoire tend vers 1, dépasse même l'unité, comme Charles Richet et Hanriot l'ont si bien vu dans leurs remarquables travaux.

En se basant, comme valeur du quotient respiratoire, sur 0,85 on peut adopter un chiffre moyen : 4 calories 83 pour un litre d'oxygène brûlé et 5 calories 4 pour un litre d'acide carbonique exhalé.

Cette méthode fut utilisée pour la première fois, en 1859, par un Anglais du nom de Smith, qui présenta, à la Société royale de Londres, deux mémoires sur la marche.

Mais c'est à Zuntz, dans son laboratoire de Berlin, qu'il fut donné d'inaugurer brillamment cette nouvelle méthode. Ses expériences eurent lieu, soit dans son laboratoire, soit en montagne, dans les Alpes, au voisinage du Zermatt et du col d'Olen ; elles furent faites sur cinq sujets, que l'on munissait d'un spiromètre fixé sur le dos et d'un appareil pour l'échantillonnage. Le sujet respirait par la bouche à travers une soupape de Zuntz, et portait une pince nasale. Zuntz faisait parcourir à son sujet une distance variable, pendant 8 à 10 minutes. Il s'attachait, d'autre part, à mesurer très exactement le métabolisme basal, c'est-à-dire l'énergie dépensée par le sujet alors qu'il est couché et qu'il n'effectue aucun mouvement, que ses dépenses sont, en un mot, réduites au minimum. Il posait ensuite comme postulat que ce métabolisme basal restait constant quel que soit l'effort fait par le sujet. Il avait donc, par différence entre ce chiffre et le chiffre des dépenses pendant le travail, l'énergie dépensée, propre au travail effectué. Il semble que ce postulat soit inexact, et l'on tend, à l'heure actuelle, à considérer

que le métabolisme de base est influencé par le travail et qu'il varie. Mais il est juste de comprendre dans un travail donné l'énergie supplémentaire mise en jeu par notre organisme à cette occasion.

Enfin, Durig, de Vienne, s'attaqua au même problème, et fournit des travaux universellement appréciés. Il obtint une valeur de 0,55 gramme-calorie par kilogramme transporté à un mètre horizontal, unité que Benedict a appelée : le mètrekilogramme horizontal, tant que la vitesse de marche n'est pas trop considérable. Mais dès que la vitesse dépassait 80 mètres à la minute, vitesse que Durig nomma : « vitesse maxima économique », la dépense par mètrekilogramme augmentait également. Pour chaque mètre dépassant cette vitesse, il trouva que la dépense d'énergie s'élevait de 1,2 à 1,5 % de sa valeur normale.

Il se préoccupa beaucoup, lui aussi, du métabolisme basal. C'est dans son laboratoire qu'en 1912 et en 1914, Brezina et Kolmer firent deux séries d'expériences sur la marche ; leurs sujets ne travaillaient que 12 heures après les repas, pour éviter l'influence de la digestion.

Ils donnèrent comme valeur moyenne du métabolisme basal 1083 petites calories par minute, soit 1420 grandes calories par 24 heures.

Nous devons citer encore les travaux de Douglas, Haldane, Henderans et Schneider à Oxford, en 1913, et ceux de Galioti, Barkan, Guiliant, Higgins, Signoulli et Viale, faits au Mont-Rose en 1914.

En 1921, Chailley-Bert fait une étude de la marche en terrain horizontal et en montée. Il utilise le tapis roulant installé au laboratoire de physiologie appliquée à l'éducation physique de la Faculté de Médecine de Paris, dirigé par le Professeur Langlois. Les résultats obtenus semblent faibles par rapport aux moyennes données par les différents auteurs qui se sont occupés des mêmes problèmes. Le mètre-kilogramme horizontal reviendrait, d'après lui, à 0,420 petites calories en terrain horizontal, à 0,800 pour une pente de 5 % et à 1,100 pour une pente de 10 %.

Mais nous devons nous arrêter aux recherches faites au « Carnegie Institution of Washington » par Benedict et Murschlauser, en 1915, et en 1922 par Monmouth Smith. Nous ne parlerons ici que des expériences, faites par ce dernier auteur qui utilisa les instruments ayant servi à Benedict et à Murschlauser, employa les mêmes méthodes, et étudia la marche ascendante sur plan incliné. Le sujet se déplace sur un tapis roulant, courroie de 4 mètres 35 de long qui tourne sur deux poulies de 0 m. 41 de diamètre. Sous la partie du tapis qui supporte le sujet, se trouvent des rouleaux montés sur billes destinés à diminuer le frottement. Un moteur électrique de 1/2 cheval entraîne le tapis à une vitesse allant de 3 à 9 kilomètres. Le tout est monté sur un châssis en bois portant à une de ses extrémités deux vis de calage, permettant de lui donner l'inclinaison que l'on désire.

L'appareil servant à mesurer les échanges respiratoires est l'appareil de Regnault et Reiset, modifié par Regnard et Jolyet. Un circuit d'air fermé est en relation avec le sujet par un appareil buccal et nasal. L'air est chassé dans le circuit par un ventilateur électrique et passe, après avoir été respiré, à travers des flacons laveurs, où il se décharge de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique. Ce même air retourne au sujet pour être respiré à nouveau, après avoir été humidifié et oxygéné avec une quantité mesurée de ce gaz. On absorbe la vapeur d'eau à l'aide d'acide sulfurique concentrée, et l'acide carbonique à l'aide de chaux sodée.

Smith s'est aussi préoccupé de mesurer les modifications physiologiques dues à la marche. Nous ne décrirons que l'appareil qu'il employa pour mesurer les oscillations verticales du centre de gravité.

Cet appareil est constitué par une fourchette en bois léger fixée aux épaules du sujet, ayant deux mètres de long ; elle est articulée à une de ses extrémités. Elle présente deux encoches dans lesquelles passent deux liens élastiques s'attachant aux épaules du sujet. Par des prises cinématographiques, Smith a montré que le mouvement des épaules n'était pas absolument comparable à celui de la taille, mais faute d'appareil meilleur, il se contenta de celui que nous venons de décrire.

Smith se proposa de calculer l'énergie dépensée par l'organisme humain pour s'élever par ses propres moyens à une hauteur déterminée en marchant

sur un plan incliné. Il adopta un plan d'étude que l'on peut résumer ainsi : mesurer :

1° L'énergie nécessaire aux fonctions vitales, telles que la respiration, la circulation, quand le corps est au repos.

2° L'énergie nécessaire aux mouvements musculaires indispensables à la marche.

3° L'énergie nécessaire à l'élévation du corps.

Il fit, pour résoudre ces différents problèmes, trois séries d'expériences : la première série avait pour but de déterminer l'énergie dépensée par le sujet debout et n'exécutant aucun mouvement. Au cours d'une deuxième série, il mesura l'énergie dépensée par le sujet marchant à des vitesses différentes ; c'est ainsi qu'il détermina la valeur de l'énergie dépensée par mètrekilogramme horizontal. Dans une troisième série d'expériences, il détermina l'énergie nécessaire à l'élévation de un kilogramme de poids corporel à la hauteur de un mètre. Cette énergie fut calculée en fonction de la pente et de la vitesse. Les vitesses utilisées furent celles qui avaient été employées dans la marche horizontale.

Smith conclut que le métabolisme de l'homme debout a une valeur de 1,18 grande calorie par kilogramme de poids et par heure, soit 28 calories 4 par 24 heures. Si l'on compare ce chiffre à la moyenne des métabolismes basaux, soit 25 calories 3 par kilogramme de poids et par 24 heures, on

déduit que le métabolisme statique a pour valeur le métabolisme basal augmenté de $1/12$.

Dans la marche horizontale, si l'on prend comme base le métabolisme statique, l'augmentation de l'énergie dépensée en marchant horizontalement pour les huit sujets qui ont été étudiés, varie entre 0,454 petite calorie et 0,618 petite calorie par mètrekilogramme horizontal.

Tant que la vitesse ne dépassa pas 80 mètres à la minute, l'augmentation de la dépense d'énergie ne fut guère sensible ; au-delà de ce chiffre chaque augmentation de vitesse produisait une dépense d'énergie sensiblement plus grande.

Pour la marche ascendante la chaleur totale dépensée augmente d'une façon uniforme par kilogrammètre de travail effectué, mais quand le même travail est effectué sur une pente rapide avec une vitesse lente la dépense d'énergie est moindre que sur une pente faite avec une vitesse plus grande. Le rendement d'une personne montant sur un plan incliné est voisin de 30 % tant que le travail ne dépasse par 500 kilogrammètres par minute, et lorsque le travail dépasse ce chiffre le rendement diminue.

Nous abordons maintenant des travaux où furent étudiées les dépenses énergétiques dans la marche descendante sur plan incliné. Amar, en 1914, constata que dans la marche en descente, pour une pente de 8 %, la dépense énergétique était supérieu-

re à celle de la marche en terrain horizontal, et que pour une pente de 13 % elle était inférieure.

En dernier lieu Magne fit, en 1919, des recherches sur la dépense d'énergie dans la marche de l'homme en terrain horizontal et incliné. (*Journ. de Physiol. et Path. Gén.*, 1920, n° 6). Ces dépenses d'énergie furent étudiées en fonction de l'amplitude et de la fréquence du pas ; la vitesse, d'après cet auteur, ne déterminant pas la marche d'une façon suffisamment précise.

Pour mesurer les dépenses d'énergie, la méthode employée fut la méthode respiratoire. Toutes les expériences furent faites sur un sujet de 84 kilogrammes et d'une taille de 1 m. 80. Il était soumis à un régime mixte où prédominaient les hydrates de carbone. Pour éliminer l'influence de la digestion les expériences eurent lieu le matin à jeun, douze heures après le dernier repas.

La récolte de l'air expiré était faite à l'aide d'une soupape de Tissot. L'air était dirigé dans un gros sac en caoutchouc d'une contenance de 500 litres environ. Ce sac était fixé au dos du sujet par des courroies. Un prélèvement était fait aussitôt l'expérience terminée, dans une ampoule de verre, par déplacement d'une solution saturée et acide de chlorure de sodium. La contenance du sac était mesurée à l'aide d'aspirateurs gradués. Les analyses d'air furent faites sur des volumes de 75 cc. dans un tube eudiométrique gradué en 1/10 de cc.

On dosait l'acide carbonique à l'aide de la po-

lasse, et l'oxygène par explosion après mélange convenable avec de l'hydrogène pur.

Pour la marche en pente, Magne, qui ne disposait que de pentes dont la longueur était très faible, dut avoir recours à une méthode indirecte. Le sujet étant au repos et ayant une ventilation constante, il commençait le travail dont il voulait mesurer la dépense, et en même temps récoltait l'air expiré. Le travail terminé, le sujet reprenait le repos et l'on continuait à recueillir l'air expiré, tant qu'il n'avait pas retrouvé le régime respiratoire du repos. La valeur des échanges pendant le travail s'obtenait par différence entre le chiffre brut donné par l'expérience et celui qui est représenté par la dépense pendant les trois à six minutes de repos consécutives jusqu'au retour au calme.

Les dépenses d'énergie en marche ascendante et en descente furent étudiées dans trois séries de dix expériences chacune, sur trois rampes : 4,80 ; 0,75 et 15,31 %, ayant respectivement : 300, 200 et 150 mètres de longueur. Magne admet, à ce moment, que l'on peut se dispenser de considérer isolément l'influence de l'amplitude et de la fréquence sur la dépense, et la rapporter uniquement à la vitesse.

Dans la descente, il trouva que la dépense n'augmente pas avec l'inclinaison de la rampe, mais qu'au contraire elle diminue. La dépense supplémentaire due au travail négatif fait par les muscles qui soutiennent le centre de gravité est donc com-

pensée par une économie faite sur les dépenses de la marche horizontale.

Il donne pour raison celle déjà admise et posée comme postulat par Lefèvre, à savoir que cette économie est due à une diminution de l'oscillation verticale du centre de gravité. Celle-ci est estimée par l'auteur à 3 cm. dans la marche horizontale. Dans une descente à 10 % par exemple, on aura donc à chaque demi-pas une élévation de 3 cm. et une chute de 10 cm. 5. Il semble que la marche fasse l'économie d'au moins une partie de l'élévation, et l'économie sera maxima quand la pente sera suffisante pour que le mouvement d'élévation ait complètement disparu.

L'auteur rapporte d'abord la dépense d'énergie à l'espace horizontal parcouru, il en conclut qu'il existe pour chaque pente une vitesse optima, et que, pour une pente de 10 % en particulier, 85 mètres est la vitesse la plus économique ; puis il rapporte la dépense d'énergie à l'espace vertical, il en conclut, dans ce cas, que l'on a intérêt à prendre la pente la plus rapide. C'est ainsi que la dépense par unité de hauteur ascensionnée ou descendue est la plus faible.

D'où cette conclusion : dans la marche en terrain incliné le piéton aura toujours intérêt, soit pour monter, soit pour descendre, à choisir la plus grande pente de terrain.

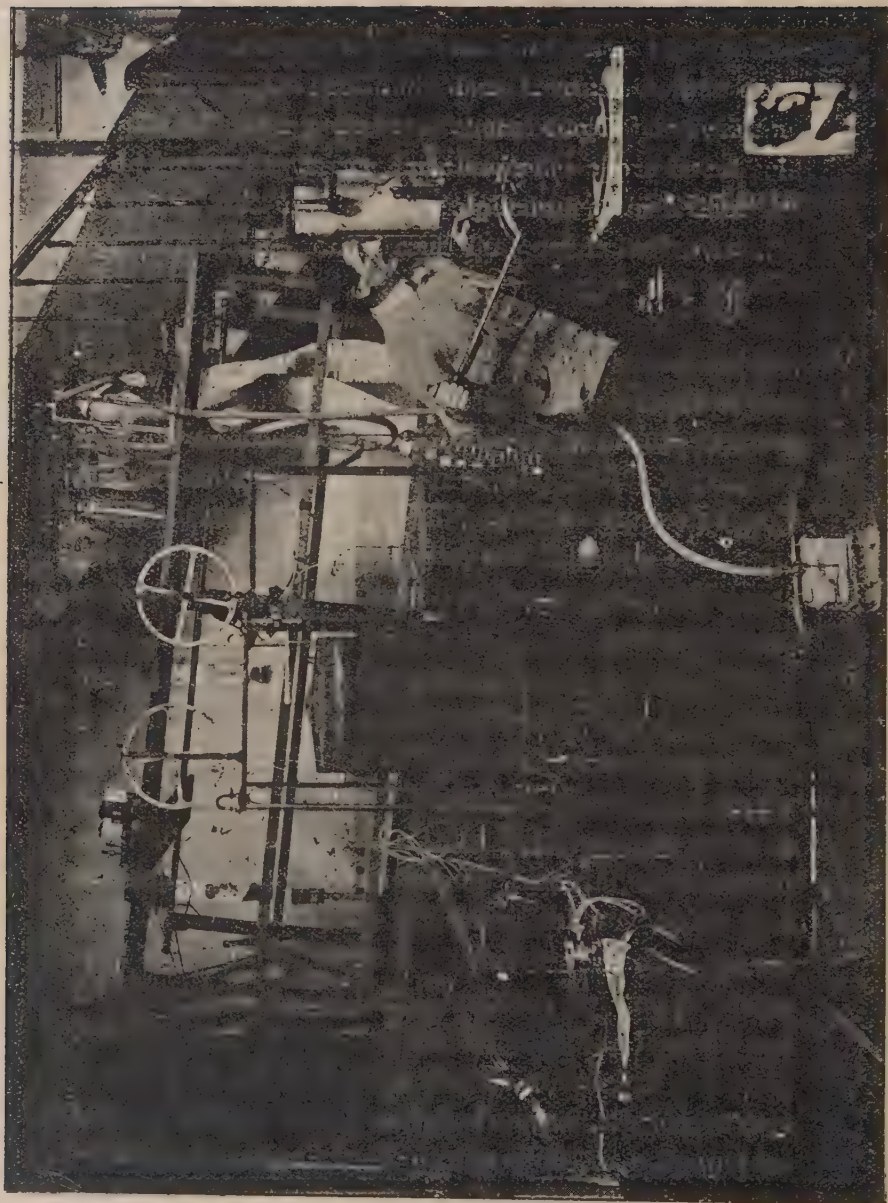
Il n'est pas douteux que les conditions dans lesquelles Magne opérait étaient trop défectueuses

pour permettre une étude précise des phénomènes de la descente. Les pentes étaient de longueur trop faible, leur degré d'inclinaison variait dans des limites trop étroites. Il faudrait méconnaître complètement l'effet de la mise en train si remarquablement mise en valeur dans les travaux de Broca et Charles Richet et le phénomène du « second wind » ou second souffle des coureurs de Lagrange, dont on doit seul tenir compte, puisque c'est le régime qui s'établit le plus longtemps, presque indéfiniment, s'il n'apparaît aucun phénomène de fatigue ou d'essoufflement.

Technique des Expériences

Nous avons utilisé pour notre étude de la marche le tapis roulant installé au laboratoire de physiologie appliqué à l'éducation physique. Ces études furent faites par le personnel du laboratoire d'organisation technique du travail humain du Conservatoire National des Arts et Métiers, ces deux laboratoires étant sous la direction de M. le Professeur Langlois.

Le tapis roulant utilisé, déjà décrit dans un compte rendu présenté à l'Académie des Sciences par le Professeur Langlois (C. R. Ac. Sc. t. 172, p. 1447, 6 juin 1921) est constitué par une courroie en cuir, sans fin, de 8 mètres de longueur et 52 centimètres de largeur, tendue entre deux poulies en bois de 52 cm. de diamètre. L'une de ces poulies est folle, l'autre est calée sur un arbre qui peut être entraîné par un moteur électrique. Ces deux poulies d'axe à axe sont distantes de 3 mètres 18. Un plancher fixé sur le châssis de l'appareil, poli et talqué avec soin, supporte la partie de courroie utilisable, soit 2 m. 80 environ. Tout l'appareil peut pivoter autour de l'axe d'entraînement et prendre une



inclinaison pouvant aller jusqu'à 35 cm. par mètre. Le système d'élévation, très simple, est constitué par un treuil scellé dans le mur du laboratoire, à 3 mètres de hauteur, avec deux contre-poids de 80 kg. chacun. Une vis sans fin actionne le treuil et permet de placer le tapis dans n'importe quelle position entre 0 et 35 %. Un tenon placé à l'extrémité du tapis et glissant dans un fer en U assure la stabilité de l'appareil. Le moteur électrique utilisé a une puissance de cinq chevaux environ, et les variations de vitesse sont obtenues par décalage des balais. Grâce à ce dispositif, on peut faire varier les vitesses du tapis de 50 à 400 mètres par minute, soit de 3 à 24 kilomètres à l'heure. Le moteur étant réversible, on peut à volonté étudier la montée ou la descente. Deux petites banquettes reposeirs sont fixées de chaque côté du bâtis de l'appareil et permettent au sujet de ne marcher qu'au moment où la vitesse désirée est atteinte. Cet appareil, bien conçu et parfaitement exécuté, peut donc permettre une étude très précise de la marche.

Le sujet va marcher sur le tapis roulant, mais en sens contraire du mouvement qu'on imprime à la piste mobile. Il sera donc, par rapport au châssis de l'appareil, complètement immobile. Une première objection vient immédiatement à l'esprit : si le sujet ne bouge pas, il ne travaille pas, puisque le travail est toujours mesuré par le produit d'une force, par le déplacement de son point d'application.

Il suffit de se reporter à la mécanique pour voir qu'il n'en est rien.

En vertu du principe d'inertie, on ne change rien aux forces d'un système si l'on ajoute à l'ensemble de ce système un mouvement de translation à vitesse constante, c'est-à-dire un mouvement correspondant à l'équation : $X = A + bt$ dont la vitesse est égale à b et dont l'accélération y dérivée seconde est $= 0$.

On a donc le droit de supposer le trottoir et son passager entraînés d'un mouvement de translation uniforme d'ensemble, ayant pour effet d'annuler la vitesse de la partie supérieure du trottoir sur laquelle marche le sujet ; il en résulte que ce dernier sera entraîné précisément avec cette vitesse de translation uniforme, c'est-à-dire que tout se passe pour lui comme s'il marchait sur un trottoir immobile en progressant réellement, avec une vitesse uniforme dirigée dans le sens inverse de celle qui est donnée effectivement au tapis. Le même raisonnement peut être appliqué à la montée.

Nous décrirons maintenant les divers appareils qui nous ont servi pour mesurer les dépenses énergétiques du sujet en expérience. Sur les conseils du Professeur Broca, de grosses modifications ont été apportées à bien des appareils depuis l'année 1921, date à laquelle on commença à utiliser le tapis roulant.

Le sujet porte un masque de Tissot identique à ceux qui servirent sur le front aux pointeurs d'artil-

lerie. Ce masque est relié à un jeu de soupapes fixé sur une planche. Par ce jeu de soupapes, l'air peut être inspiré dans deux spiromètres de Tissot, parfaitement équilibrés, et montés en parrallèle. L'air respiré est dirigé vers un mélangeur, dans lequel on peut faire des prélèvements, puis il est rejeté à l'extérieur. Ce dispositif présente d'immenses avantages sur celui qui le précédait. (Chailley-Bert Thèse de Méd. Paris 1921). En effet, aucune résistance n'est offerte à la respiration, les spiromètres sont parfaitement équilibrés, le calibre des tubes d'arrivée et de sortie est d'un diamètre supérieur à celui de la trachée. Le masque de Tissot est utilisé comme il doit l'être, puisque nous n'exigeons son étanchéité absolue qu'à l'inspiration.

Notre sujet a pu faire les exercices les plus violents, sans que sa respiration fût gênée, et sans que notre appareil eût présenté de fuites.

Le poids total de l'appareillage supporté par le sujet est inférieur à 700 grammes. Le mélangeur est constitué par un vase de 5 litres environ, hermétiquement fermé, auquel aboutit le tuyau conduisant l'air expiré. C'est dans ce mélangeur qu'est prélevé l'air à analyser, à l'aide d'un simple énéma qui sert de pompe aspirante et foulante. L'air est recueilli ensuite dans des petits ballons, d'un volume de 200 cc., en caoutchouc épais. L'analyse est faite immédiatement après le prélèvement à l'aide d'un eudiomètre de Laulanié, dont la description se trouve dans tous les traités de physiologie.

Dans toutes nos expériences, nous n'avons recherché que le volume d'acide carbonique contenu dans l'air expiré, pour évaluer la dépense d'énergie due au travail. A la suite d'une expérience faite en commun avec le professeur Waller, de Londres, relatée dans un compte rendu de la Société de Biologie (12 nov. 1921), nous nous sommes rendu compte que la détermination du volume de CO_2 permettait une évaluation suffisamment précise de l'énergie dépensée. Le professeur Waller, utilisant ses techniques et appareils, avait déterminé, par dosage de CO_2 , les échanges du sujet en marche. Nous mêmes, en faisant des prélèvements réguliers d'air expiré, avons effectué des dosages d'oxygène à l'aide d'un Laulanié modifié par nous. Nous avons remarqué que l'absorption de l'oxygène par le phosphore était considérablement augmentée quand ce corps était à une température voisine de sa température de fusion. Nous avons donc placé derrière le flacon à phosphore, un petit radiateur électrique, qui fonctionne seulement quand l'eau protège le phosphore. Le courant est, en effet, interrompu dès que l'air pénètre dans le réservoir. Cette modification nous a permis d'accélérer considérablement la réaction, le temps mis à faire un dosage se trouve réduit des $2/3$. Un reproche peut, à première vue, être fait à ce dispositif : c'est que nous chauffons l'air que nous allons avoir à mesurer ; mais il ne faut pas oublier que sa température n'est élevée que d'une dizaine de degrés environ, que la chaleur spé-

cifique de ce fluide est très faible, qu'il sera donc ramené rapidement à la température de l'eau de la cuve. Les résultats des deux méthodes ayant été confrontés, nous avons constaté que les différences étaient tellement faibles que dans les conditions où nous opérons elles pouvaient être négligées. Le professeur Langlois pense que l'on peut admettre le chiffre de 5 calories 43 pour un litre d'acide carbonique exhalé. C'est ce chiffre, arrondi à 5 calories 5, que nous avons utilisé dans nos expériences.

Nous n'avons pas tenu compte de la résistance de l'air à l'avancement du sujet, sa valeur étant négligeable pour les vitesses que nous avons employées.

Notre plan d'études peut se résumer ainsi :

1° Détermination du métabolisme statique, c'est-à-dire du métabolisme de l'individu debout, ne faisant aucun mouvement.

2° Détermination de l'énergie dépensée par le sujet descendant une pente à une vitesse, toujours la même, avec une fréquence et une amplitude de pas constantes.

L'homme qui servit à toutes les expériences a une taille de 1 m. 61 et pèse 52 kilogrammes. Il est revêtu d'un maillot, d'un pantalon en toile, et porte des sandales. Nous regrettons de ne pas avoir pu étudier sur d'autres sujets, la marche en descente, mais nous nous sommes heurtés à des impossibilités matérielles. Pour les mêmes raisons, nous avons dû faire nos expériences l'après-midi, et pour élimi-

ner autant que possible les causes perturbatrices de la digestion nous avons toujours opéré à la même heure, 4 heures après la fin du repas.

Dans toutes nos expériences, la seule variable fut la pente. La vitesse du tapis fut uniforme et constante : 4 k. 500 à l'heure, l'amplitude du pas : 0 m. 62 et la fréquence : 120 pas à la minute.

L'unité de travail que nous avons prise est le mètrekilogramme, c'est-à-dire le travail nécessité par le transport de 1 kilogramme à un mètre, compté sur le plan sur lequel marche le sujet. Nous avons choisi cette unité, parce que c'est celle que la plupart des auteurs, avant nous, ont utilisée, et qu'elle est vraiment pratique. Nous avons calculé l'énergie correspondant à ce travail en petites calories.

Une première série d'expériences fut faite au cours de l'année 1922. Nous donnerons le protocole de chaque expérience séparément, et nous comparerons ensuite les résultats obtenus.

Toute expérience débutait par la mesure du métabolisme statique. Le sujet pesé mettait le masque. Il demeurait debout et complètement immobile pendant 10 minutes. Sa ventilation, dès qu'elle était devenue constante, était enregistrée minute par minute et à la fin des 5 minutes, nous opérions un prélèvement qui était immédiatement analysé.

Le tapis était alors mis en route, et dès que la vitesse de 4 km. 500 était acquise, le sujet se mettait en marche. L'expérience ne débutait que lorsque le sujet présentait une ventilation constante, qu'il était,

en un mot, arrivé à un régime constant (Broca et Richet). La durée de chaque expérience était de $1/4$ d'heure, ou d'une demi-heure. Le sujet restait ensuite immobile pendant 5 minutes, afin que son retour au calme puisse être étudié.

Pendant toute la durée de l'expérience, la ventilation du sujet était prise minute par minute, et un prélèvement de l'air expiré était fait toutes les 5 minutes et immédiatement analysé.

Nous avons fait les corrections de température et de pression pour tous les chiffres que nous donnons.

Expérience n° 1. 23 mai 1920. Départ 16 h. 5.

Pente 0 %. Sujet Scellos. Tenue sport. Poids 51 kg. 390.

Vitesse du tapis : 4 km. 500. Durée de l'expérience : 20 minutes.

Temps en minutes	CO ₂ par minute en cc.	Kilogrammètres par minute
0	198	461
5	516	1207
10	574	1338
15	559	1305
20	512	1196

Energie brute moyenne, par minute : 1261 kgm.

Energie nette : 800 kgm. correspondant à :
o c. 484 par mètrakilogramme.

Expérience n° 2. — 11 mars 1922.

Départ : 16 heures. Descente 5 %.

Sujet Scellos. Tenue sport. Poids 52 kg. 540. Vitesse du tapis : 4 km. 500.

Temps en minutes CO₂ par minute en cc. Kilogrammètres par minute

0	136	316
5	448	1043
10	499	1162
15	468	1080

Energie brute moyenne, par minute : 1095. Energie nette : 779, correspondant à 0 c. 468 par mètre-kilogramme.

Expériences n° 3. — 14 mars 1922.

Départ : 16 heures. Descente : 10 %.

Sujet Scellos. Tenue sport. Poids 52 kg. 410. Vitesse du tapis ; 4 km. 500.

Temps en minutes CO₂ par minute en cc. Kilogrammètres par minute

0	172	400
5	391	911
10	358	834
15	360	838

Energie brute moyenne par minute : 861. Energie nette : 461 correspondant à 0 c. 277, par mètre-kilogramme.

Expérience n° 4. — 18 mars 1922.

Départ : 16 heures. Descente : 15 %.

Sujet Scellos. Tenue sport. Poids : 53 kg. Vitesse du tapis : 4 km. 500.

Temps en minutes	CO ₂ par minute en cc.	Kilogrammètres par minute
0	189	442
5	366	853
10	414	964
15	324	754

Energie brute moyenne, par minute : 823. Energie nette : 381, correspondant à 0 c. 229 par mètre-kilogramme.

Expérience n° 5. — 16 mai 1922.

Départ : 16 heures. Descente : 20 %.

Sujet Scellos. Tenue sport. Poids : 53 kg. Vitesse du tapis : 4 km. 500.

Temps en minutes	CO ₂ par minute en cc.	Kilogrammètres par minute
0	203	472
5	506	1178
10	527	1227
15	630	1467

Energie brute moyenne, par minute : 1290. Energie nette : 818 correspondant à 0 c. 493 par mètrekilogramme.

Expérience n° 6. — 29 mars 1922.

Départ : 16 heures. Descente : 25 %.

Sujet Scellos. Tenue sport. Poids : 53 kg. 200. Vitesse du tapis : 4 km. 500.

Temps en minutes CO₂ par minute en cc. Kilogrammètres par minute

0	134	312
5	483	1125
10	560	1304
15	601	1400

Energie brute moyenne, par minute : 1276. Energie nette : 964, correspondant à 0 c. 584 par mètre-kilogramme.

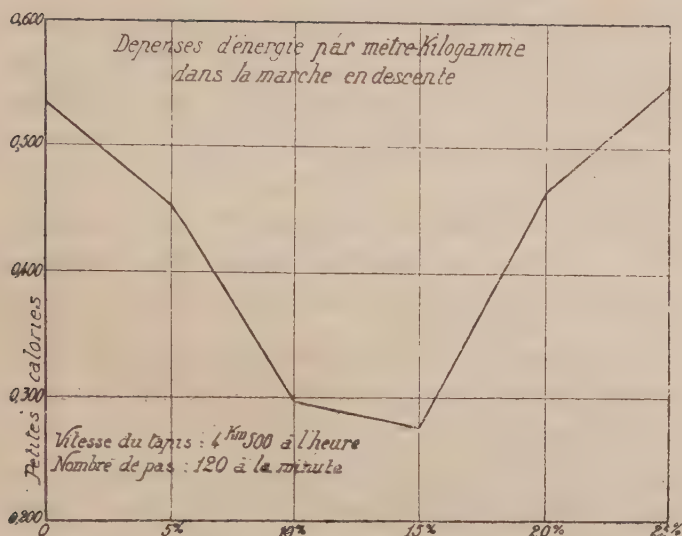
Comparons les résultats données par ces différentes expériences :

Dépense par mètrekilogramme

0 %	0 c. 484
5 %	0 c. 468
10 %	0 c. 267
15 %	0 c. 229
20 %	0 c. 493
25 %	0 c. 584

Nous voyons immédiatement, que la dépense par mètrekilogramme décroît d'abord, passe par un minimum pour une descente de 15 %, puis augmente, pour dépasser à partir d'une pente de 20 % la dépense par mètrekilogramme sur plan horizontal.

Nous avons fait plusieurs séries d'expériences analogues, et nous avons toujours obtenu des courbes identiques. Nous donnons ici le graphique que nous fournit, pour chaque pente, la moyenne de ces expériences. Il y a donc là un phénomène assez complexe, et c'est pour l'expliquer que nous avons entrepris les recherches que nous allons rapporter maintenant.



Nous avons pensé que peut-être la méthode basée sur les lois de la mécanique nous donnerait les éléments d'une explication.

Si l'on applique la formule de Lefèvre au calcul du travail fourni par un sujet quelconque, celui, par exemple, qui nous servit aux expériences, nous avons :

$$T = 3744 + 572 + 368 = 4684 \text{ kgm.}$$

En comparant les valeurs respectives des trois équivalents moteurs T^1 , T^2 , T^3 , on constate que T^1 est de beaucoup le plus important.

Utilisant le tapis roulant précédemment décrit, nous avons cherché si l'équivalent moteur T^1 n'était pas modifié pendant la marche en terrain incliné. Démeny, qui avait insisté sur les modifications ap-

portées au facteur T^1 par les variations du rythme, avait utilisé un appareil enregistreur, placé sur un chariot, pour inscrire les variations d'oscillations verticales du centre de gravité. La complexité des mouvements du corps ne lui permit pas de décomposer d'une façon satisfaisante l'oscillation du centre de gravité pendant la marche. La technique de Benedict et Tigerstedt prête aux mêmes critiques.

Pour obtenir la projection des déplacements du centre de gravité sur trois axes de coordonnées, nous avons remplacé le chariot porte inscripteur de Démeny par un enregistreur très léger relié à la ceinture de notre sujet par une tige rigide oscillante autour d'un axe horizontal et maintenue dans un plan vertical par une fourche. Le tout est solidaire d'un petit chariot à roulette se déplaçant sur un chemin de roulement parallèle au plan du tapis. Le chariot est assujéti à suivre exactement la composante horizontale du mouvement du centre de gravité. Il porte l'appareil d'inscription sur lequel s'enregistre le mouvement angulaire de la tige d'attelage, c'est-à-dire une amplitude proportionnelle à l'oscillation du centre de gravité.

Nous inscrivons bien cette oscillation. En effet, supposons le tapis immobile. Nous comptons la hauteur utile. Ceci étant, donnons à l'ensemble le mouvement du tapis, tout viendra à la position finale. Pendant cette seconde partie du mouvement le levier ne bougera pas si le mouvement du centre de gravité est parallèle au plan du tapis.

Les expériences ont été poursuivies sur des sujets des deux sexes, dont les tailles étaient comprises entre 1 m. 57 et 1 m. 82. La vitesse du tapis, constante et uniforme, était de 4 km. 500 à l'heure, correspondant au minimum de l'oscillation verticale du centre de gravité. Le rythme était constant pour un même sujet. Les inscriptions ont été prises avec des pentes de 5, 10 et 15 %, tant à la montée qu'à la descente.

Sujets	Taille	Montée :					Descente		
		15 %	10 %	5 %	0 %	5 %	10 %	15 %	
S.	1 m. 57	59	49	45	35	34	52	67	
»	1 m. 62	62	45	40	34				
V.	1 m. 82	49	40	40	36				
M ^{me} G.	1 m. 67	49	47	40	35				
M ^{lle} C.	1 m. 57				31	28	40	44	
M ^{lle} S.	1 m. 59	42	32	28	24	20	24	32	

Oscillations verticales du centre de gravité en fonction de la pente en millimètres.

Nous pouvons donc conclure que d'une façon générale, l'oscillation verticale du centre de gravité n'est pas constante pendant la marche en terrain incliné. Elle varie dans le même sens que la valeur absolue de la pente ; et en particulier dans la descente, au-dessus d'une pente de 5 %, contrairement à l'hypothèse généralement admise, elle est plus grande que dans la marche horizontale.

L'explication que Magne donne de ce phénomène paradoxal qu'est la descente sur plan incliné, ne

paraît pas être justifiée. Le sujet, loin d'annuler son oscillation verticale, l'augmente considérablement. On peut directement constater que lorsqu'on descend, on oscille verticalement beaucoup plus que lorsqu'on marche sur un terrain horizontal.

Le sujet augmente donc son travail de marche, et nous constatons cependant que l'énergie dépensée est plus faible. Nous sommes obligés d'admettre, que l'organisme, lorsqu'il descend, fait une véritable recette d'énergie, qu'il utilise l'énergie potentielle qu'il possède à sa locomotion.

Pour le démontrer, nous avons fait une série d'expériences comparatives, pendant lesquelles le sujet descendait pendant 15 minutes une pente donnée, puis marchait sur un plan horizontal, entraîné par une force égale à la composante de son poids, parallèle à la pente considérée.

Cette composante nous est donnée par la formule :

$$F = P \sin. \theta$$

dans laquelle P est le poids du sujet, θ l'angle de pente.

Si P est égal à 52 kg. par calcul logarithmique on détermine F.

Pente	Composante (F)
5 %.....	2 kg. 6
10 %.....	5 kg. 1
15 %.....	7 kg. 7
20 %.....	10 kg. 2
25 %.....	12 kg. 6

Le dispositif que nous avons employé est très simple. Le sujet marche sur un plan horizontal et porte une large ceinture à laquelle est attaché, sur sa partie ventrale, un cable. En face du sujet, à l'extrémité du trottoir roulant, se trouve une table supportant une molette d'un diamètre suffisant pour que nous puissions dédaigner les frottements. Le cable étant supporté par la molette, nous suspendions à son extrémité libre un poids égal à la composante parallèle de la pente étudiée, puis nous faisions les mêmes expériences que précédemment.

Nous ne donnerons ici que les résultats finaux : l'énergie dépensée par mètrekilogramme en petites calories.

Expérience n° 1. — 25 mai 1923. Départ : 16 heures. Pente 0 %.

Sujets Scellos. Poids : 52 kg. 400. Vitesse du tapis : 4 km. 500.

Métabolisme statique : 376 kgm. par minute.

Energie moyenne brute : 1267. Energie moyenne nette : 891, correspondant à 0 c. 537 par mètrekilogramme.

Expérience n° 2. — 17 mai 1923. Départ 15 h. 45. Descente 5 %.

Sujet Scellos. Poids : 52 kg. 400. Vitesse du tapis : 4 km. 500.

Métabolisme statique : 473 kgm. par minute.

Energie moyenne brute : 1132 ; Energie moyenne nette : 759, correspondant à 0 c. 456 par mètrekilogramme.

Oscillation verticale moyenne du centre de gravité : 3 cm. 4.

A-16 heures : pente 0 %. Poids de traction : 2 kg. 6.

Energie moyenne brute : 1132 ; Energie moyenne nette : 759.

Correspondant à 0 c. 456 par mètrekilogramme.

Oscillation verticale moyenne du centre de gravité : 3 cm. 6.

Expérience n° 3. — 18 mai 1923. Départ : 16 heures. Descente 10 %.

Sujet Scellos. Poids : 52 kg. 900. Vitesse du tapis : 4 km. 500.

Métabolisme statique : 475 kgm. par minute.

Energie moyenne brute : 1051 ; Energie moyenne nette : 576.

Correspondant à 0 c. 349 par mètrekilogramme.

Oscillation verticale du centre de gravité : 4 cm. 5.

A. 16 h. 15 : pente 0 %. Poids de traction : 5 kg. 1.

Energie moyenne brute : 1056 ; Energie nette : 581.

Correspondant à 0 c. 350 par mètrekilogramme.

Oscillation verticale moyenne du centre de gravité : 4 cm. 7.

Expérience n° 4. — 15 mai 1923. Départ : 15 h. 30. Descente 15 %.

Sujet Scellos. Poids : 52 kg. 300. Vitesse du tapis : 4 km. 500.

Métabolisme statique : 410 kgm. par minute.

Energie moyenne brute par minute : 919 kgm.

Energie nette : 509.

Correspondant à 0 c. 306 par mètrekilogramme.

Oscillation verticale moyenne du centre de gravité : 5 cm. 9.

A 15 h. 45 : pente 0 %. Poids de traction : 7 kg. 7.

Energie moyenne brute par minute : 902 kgm.

Energie nette : 492, correspondant à 0 c. 295 par mètrekilogramme.

Oscillation verticale moyenne du centre de gravité : 6 cm.

Expérience n° 5. — 19 Mai 1923. Départ : 15 h. 30. Descente 20 %.

Sujet Scellos. Poids : 53 kg. Vitesse du tapis : 4 km. 500.

Métabolisme statique : 505 kgm. par minute

Energie moyenne brute par minute : 1302 ; Energie nette : 797, correspondant à 0 c. 478 par mètrekilogramme.

Oscillation verticale moyenné du centre de gravité : 6 cm. 7.

A 15 h. 45 : pente 0 %. Poids de traction : 10, kg. 2

Energie moyenné brute par minute : 1309 ; Energie nette : 854, correspondant à 0 c. 513 par mètrekilogramme

Oscillation verticale moyenne du centre de gravité : 6 cm. 2

Expérience n° 6. — 25 Mai 1923. Départ : 17 h.
Descente 25 %.

Sujet Scellos. Poids : 52 kg. 900. Vitesse du tapis : 4 km. 500.

Métabolisme statique : 417 kgm. par minute.

Energie moyenne brute par minute : 1331 ; Energie nette : 914, correspondant à 0 c. 551 par mètre-kilogramme.

Oscillation verticale moyenne du centre de gravité : 6 cm. 6.

A 17 h. 15 : pente 0 %. Poids de traction : 12 kg. 6.

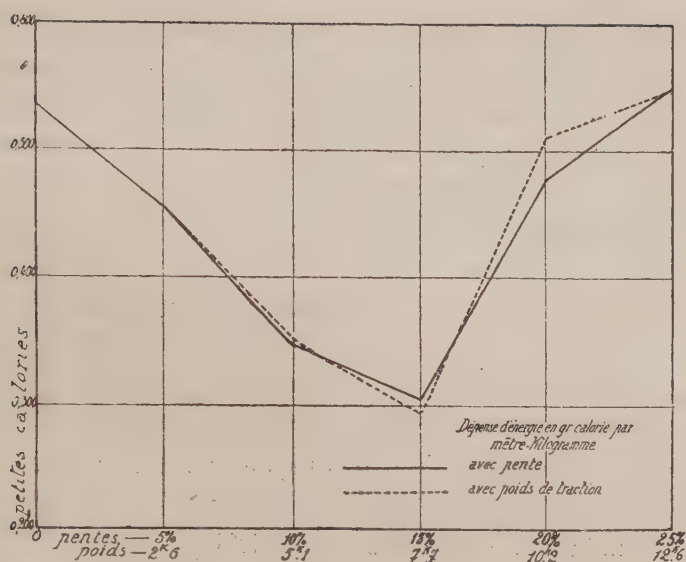
Energie moyenne brute par minute : 1332 ; Energie nette : 915, correspondant à 0 c. 551 par mètre-kilogramme.

Oscillation verticale moyenne du centre de gravité : 6 cm. 6.

Toutes ces expériences peuvent être résumées dans le tableau suivant :

Pente		Poids
5 %	0,456 par mkg.	0,456 par mkg.
10 %	0,349	0,350
15 %	0,306	0,295
20 %	0,478	0,513
25 %	0,551	0,551

Si nous prenons pour abscisses les pentes, et pour ordonnées les dépenses d'énergie, et que nous construisions les deux courbes, nous constatons qu'elles sont superposables. Il est donc bien démontré que l'organisme, dans la marche en descente, fait une



recette d'énergie, qu'il utilise l'énergie potentielle qu'il possède pour sa locomotion.

Comment expliquer le minimum par lequel passent ces deux courbes ? Le travail de la marche n'est au fond qu'une dégradation d'énergie que l'organisme peut, dans certaines limites, faire varier, en augmentant ou en diminuant son oscillation verticale. Avant de faire frein, l'organisme va chercher à dégrader l'énergie potentielle qu'il possède, en l'utilisant le mieux possible : il va s'en servir pour sa locomotion. Nous l'avons prouvé dans les expériences qui précèdent.

Pour une pente de 5 %, l'énergie potentielle est très faible : 2 kgm. 6. Le travail de la marche est

faible aussi ; l'oscillation verticale du centre de gravité est parfois plus petite que dans la marche horizontale. Si l'énergie potentielle croît, le travail de la marche croît aussi. A 10 % et à 15 % un équilibre approché s'obtient aisément, l'organisme ne travaille presque plus, il s'établit un plateau, et la dépense est minima.

Mais nous ne pouvons augmenter indéfiniment l'oscillation verticale de notre centre de gravité ; il arrive un moment où le travail de la marche est insuffisant pour neutraliser l'énergie potentielle que nous possédons. Nous devons alors faire frein. La dépense d'énergie croît à nouveau.

Nous avons calculé, à l'aide de la formule de Lefèvre, l'équivalent moteur de la marche correspondant à notre sujet, pour les oscillations qu'il a présentées pendant la marche en descente, et nous les avons comparées à la valeur du travail de l'énergie potentielle qu'il possédait.

Pente	Travail en marche : T^1	Travail de la composante : T
5 %	5 kgm. 2	2 kgm. 6
10. % $t^1 > t^2$	6 kgm. 7	5 kgm. 1
15 %	8 kgm. 3	7 kgm. 7
20 % $t^1 < t^2$	9 kgm. 3	10 kgm. 2
25 %	9 kgm. 2	12 kgm. 6

Au-dessus de 15 % l'inégalité des deux travaux change de sens.

Nous voyons que notre hypothèse se vérifie aisément. Nous avons là, une fois de plus, la preuve de

la magnifique adaptation de l'organisme à un travail donné, et c'est cette adaptation méconnue qui rendait le phénomène de la descente si difficile à interpréter.

Donc, si nous voulions donner de la marche en descente une formule permettant de calculer son équivalent moteur, nous croyons que celle qui donnerait la valeur la plus approchée serait :

$$T = t^1 - t^2$$

dans laquelle t^1 serait égal au travail de la marche, et t^2 au travail de la pente. Quand T devient négatif il suffit d'appliquer la loi sur le travail résistant de Chauveau. Cette formule nous a permis de calculer des rendements compris entre 28 et 35 %, rendements très voisins des chiffres trouvés, pour la marche, par Gautier.

Nous avons donné un tableau rapportant les dépenses d'énergie à l'espace horizontal, il serait intéressant d'établir le rapport de la dépense à l'espace vertical parcouru. Nous prenons pour unité, le kilogrammètre résistant, c'est-à-dire le poids de 1 kilogramme descendu de un mètre. Nous exprimerons la dépense d'énergie en petite calories.

Pentes	Dépense par kilogrammètre résistant
5 %.....	8 c. 706
10 %.....	3 c. 035
15 %.....	1 c. 81
20 %.....	2 c. 216
25 %.....	2 c. 112

Nous voyons que là encore la valeur de la dépense énergétique par kilogrammètre résistant, passe par un minimum, et que ce minimum existe pour une pente de 15 %.

Il nous reste encore à calculer le rapport de transformation de l'énergie potentielle utilisée par l'organisme à sa locomotion.

Dans la marche horizontale nous avons trouvé que, en moyenne, notre sujet dépensait une énergie égale à 908 kgm. par minute. Tiré par un poids de 2 kg. 6 (pente de 5 %) il ne dépense plus que 769 kgm. Il reçoit, par minute, une énergie égale à 195 kgm. Il diminue sa dépense de 139 kgm. Le

rapport de transformation est donc égal à $\frac{70}{100}$.

Pour une pente de 15 % nous obtenons un chiffre analogue.

Conclusions

I. La mesure des échanges respiratoires pendant la marche nous montre que, pour une vitesse de 75 mètres à la minute, soit 4 km. 500 à l'heure, la dépense d'énergie, en plus du métabolisme statique, est égale à :

en palier : 0,534 petite calorie par mètrekilogramme
en descente sur plan incliné :

Pour une pente de :

5 %...	0,453	par mètrekilogramme.
10 %...	0,298	»
15 %...	0,278	»
20 %...	0,466	»
25 %...	0,553	»

II. Si l'on rapporte la dépense d'énergie au kilogrammètre résistant (1 kilogramme descendu de 1 mètre de hauteur), elle est égale à :

Pour une pente de :

5 %.....	8,706	petites calories
10 %.....	3,035	»
15 %.....	1,81	»
20 %.....	2,216	»
25 %.....	2,212	»

III. La pente de 15 %, descendue à une allure de 4 km. 500 à l'heure est celle qui nécessite la plus

petite dépense d'énergie, soit que l'on désire se déplacer horizontalement, ou descendre verticalement.

C'est cette pente qui devra être utilisée de préférence à toute autre dans un itinéraire, par le marcheur, l'excursionniste, le soldat. C'est elle qui devra être employée dans les chantiers pour le transport ou la descente des matériaux, dans les ports pour le déchargement des navires, en un mot, dans tous les lieux où il est fait usage de plans inclinés utilisés par l'homme.

IV. L'organisme humain fait, dans la marche sur plan incliné, une recette d'énergie qu'il transforme avec un rendement de 70 % environ

V. L'oscillation verticale du centre de gravité n'est pas constante pendant la marche en terrain incliné. Elle varie dans le même sens que la valeur absolue de la pente. Dans la montée nous avons intérêt à la diminuer ; nous devons nous efforcer d'utiliser la marche en flexion, imiter le montagnard dans sa marche. Dans la descente, au contraire, nous avons intérêt à l'augmenter, sauf pour les pentes faibles.

Vu, le Doyen,
ROGER.

Vu, le Président,
BROCA.

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris :

PELL.

Bibliographie

Pour tout ce qui concerne la bibliographie de Marey, voir l'article « Locomotion » du Dictionnaire de Physiologie de Ch. Richet.

ACHARD, DESBOUIS, LEBLANC et BINET. — Etude des échanges respiratoires dans les intoxications par les gaz de combat. — *Arch. de Méd. Expér.*, 1919, p. 468.

AMAR. — Le moteur humain, Paris 1923.

ATWATER (W.-O.) et BENEDICT. — A respiration calorimeter with appliances of the direct détermination of oxygen, Washington, 1905.

— On the metabolism of matter and energy, Washington, 1903.

BARTHEZ. — Nouvelle mécanique des mouvements, 1798.

BENEDICT. — The influence of inanition on metabolism, Washington, 1907.

BENEDICT et CARPENTER. — Respiration calorimeter for studying the respiratory and energy transformations of man, Washington, 1910.

— The metabolism and energy transformation of healthy man during rest, Washington, 1910.

BENEDICT et CATHCART. — Muscular work : a metabolic study with special reference to the efficiency of the human body as a machine, *Carnegie Institution Washington*, 1913.

BENEDICT et MURSCHLAUSER. — Energy transformations during horizontal walking, Washington, 1915.

BENEDICT. — A portable respiration apparatus for clinical use, *Boston med. and surg. Journ.*, 11 mai 1918.

BREZINA et KOLMER. — *Biochem. Zeitschr.*, 1912.

- BORELLI. — De motu animalium, 1686.
- BROCA. — *Physique médicale*, Paris, Ballière, 1907.
- CHAILLEY-BERT. — Etude sur la physiologie de la marche. —
Thèse Paris, 1921.
- CHAUVEAU. — C. R. Ac. Sc., 1899, p. 249 ; 27 juin 1904 ; 3
oct. 1904.
- CHAUVEAU. — Travail sur la roue de Hirn.
- COMTE et REGNAULT. — Marche en flexion. — *Arch. de phy-
siologie*, 1896.
- COULOMB. — Théorie des machines simples. *Edit. Bachelier*,
1821.
- DUCHENNE (de Boulogne). — Physiologie des mouvements,
Paris, 1867.
- DURIG et ZUNTZ. — Laboratoire scientif. internat. du Mont-
Rose. Travaux.
- DOUGLAS, HALDANE, HENDERSON et SCHNEIDER. — *Phil. trans.
Roy. Soc.*, Londres, 1913, Sér. B., 203.
- GALEOTTI. — *Reale academia dei Lincet*, Rome 1909, et *Arch.
d. Fisiol.*, 1914.
- GARIEL. — Rendement des moteurs animés. — *Traité de phy-
sique biologique*, Paris, Masson, 1904.
- GEPHART et DU BOIS. — The organisation of a small metabo-
lism. — *Ward Archiv. of Intern. Méd.*, mai 1915.
- GERDY. — Mémoire sur la marche. — *Journ. de Magendie*,
1829.
- GLEYS. — Physiologie, J. B. Baillière.
- HALDANE et PRIESTLEY. — The regulation of the lung ventila-
tion. — *Journ. of physiol.*, 1905.
- HIRN. — Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur,
Paris, 1856.
- LANGLOIS (J.-P.). — Travail dans les milieux chauds et humi-
des.
— Tapis roulant pour l'étude de la marche et du travail.
— C. R. Ac. Sc., 6 juin 1921.

- Sur le second vent des coureurs. — *C. R. Ac. Sc.*, 13 juin 1921.
- LEFEVRE. — Chaleur animale et bioénergétique, Paris, 1911.
- Sur l'équivalent moteur du travail résistant. — *C. R. Ac. Sc.*, nov. 1906.
- Formules du travail dans la marche et dans l'ascension.
— 1^{er} Congrès intern. d'hygiène alimentaire. Paris, oct. 1906.
- MAGNE. — Recherches sur la dépense d'énergie dans la marche de l'homme en terrain horizontal et incliné. — *Journ. de physiol et pathol. génér.*, 1920, T. XIII, p. 1154.
- MAREY et DEMENY. — *C. R. Ac. Sc.*, 1885.
- PEMBREY et COOKE. — The second wind. *Proc. of physiol. Society*, 1908, *Journ. of physiol.*
- Presse Médicale*. — Mouvement médical, mars 1921. Le métabolisme basal.
- RICHE et SODERSTRON. — The respiration calorimeter of the Russel Sage Institute. — *Archiv. of Intern. méd.*, mai 1915.
- SMITH H. MONMOUTH. — Gaseous exchange and physiological requirements for level and grade walking, *Carn. Inst. Washington*, avril 1922.
- SONDÉN et TIGERSTEDT. — *Skand archiv. f. physiol.*, 1895.
- WALLER. — *C. R. Soc. Biol.*, 12 mai 1921, 12 nov. 1921.
- WEBER (E. et W.). — Mécanique de la locomotion chez l'homme. — *Traduction Jourdan*, 1848.
- WOODBURY. — The basal metabolism. — *Journ. of the Americ. Méd. Assoc.*, avril 1920.
- ZUNTZ et SCHUMBURG. — Physiologie des Marsches, Berlin, 1901.
- ZUNTZ et SCHUMBURG. — *Archiv. f. d. ges. Physiol.*, 1896.
-

IMP. COMMERCIALE PERRETTE, LIMOGES

